Chapitre IV : Bilan matière

Chapitre IV

Bilan de matière globale de l'atelier d'acide nitrique

IV.1 Bilan matière

Afin d'accéder aux différents concentrations en NO_X au niveau des différents sections, un bilan de matière est nécessaire. Toutes les données opératoires de ce bilan sont prises directement de la feuille de marche.

IV.1.1 Section de conversion

Données opératoires :

Débit d'air primaire .... 56959 Nm^3/h

Température d'air à l'aspiration .... 25°C

Tension de vapeur d'eau à 25°C .... 23,77 mm hg

Débit d'ammoniac .... 6310 Nm^3/h

Température de conversion .... 880°C

Taux de conversion .... α_1=96%, α_2=4%

Taux d'oxydation de NO en NO_2 .... α_3=45%

1) Gaz entrant dans le convertisseur

a. Quantité de vapeur d'eau dans l'air primaire

Le débit d'eau est calculé d'après l'équation suivante :

$$\Psi_M = \frac{n_{H2O}}{n_{airsec}} = \frac{P_{H2O}}{P_{airsec}} = \frac{P_{H2o}}{P_t - P_{H2O}}$$

Avec :

Ψ_m : l'humidité molale, Kmol d'H2O ¿ mol d'air sec.

P_{H2O} : pression de vapeur d'eau à 25 °C = 23,77 mmHG (Voir annexe n°1)

P_{airsec} : pression d'air sec, mmHG.

P_t : pression totale de l'air, mmHG.

A.N : $\Psi_M = \frac{23,77}{760 - 23,77} = 0,032$

$\Psi_M = 0,032$ Kmol d'H2O ¿ d'air sec

Et on a :

$$G_{H2O} = \frac{\frac{\Psi_M * G_{air}}{22,4}}{(1 + \Psi_M)}$$

Avec :

G_{air} : Debit d'air primaire, Nm^3/h

A.N : $G_{H2O} = \frac{\frac{0,032 * 56959}{22,4}}{(1+0,032)} = 78,84\ Kmol/h$

$$G_{H2O} = 78,84\ Kmol/h$$

⇨ G_{H2O} = 78,84 * 18 = 1419,12 KG/h

$$G_{H2O} = 1419,12\ KG/h$$

b. Débit d'air sec :

Le débit d'air sec est la différence entre débit d'air primaire et débit d'eau contenu dans l'air primaire

$$G_{airsec} = G_{air} - G_{H2O}$$

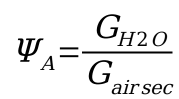
Avec :

G_{airsec} : Débit d'air sec, Kg/h

G_{air} : Débit d'air primaire, Kg/h

G_{H2O} : Débit d'eau contenu dans l'air primaire, Kg/h

- **G_{air} = ?**



$$\Psi_A = \frac{G_{H2O}}{G_{airsec}}$$



Avec :

Ψ_A : L'humidité absolue

G_{H2O} : Debit d'eau contenue dans l'air primaire, Kg/h

G_{airsec} : debit de l'air sec, Kg/h

$$G_{H2O} = \Psi_A * G_{airsec}$$

$$G_{airsec} = G_{air} - G_{H2O}$$

$$\Rightarrow \quad G_{H2O} = \frac{\Psi_A * G_{air}}{(1 + \Psi_A)}$$

$$\Rightarrow \quad G_{air} = \frac{G_{H2O} * (1 + \Psi_A)}{\Psi_A}$$

- $\Psi_A = ?$

On a : $\Psi_A = \frac{G_{H2O}}{G_{airsec}} = \frac{P_{H20}}{P_{airsec}} = \frac{M_{H20}}{M_{airsec}}$

Donc :

$$\Psi_A = \frac{\Psi_M * M_{H20}}{M_{airsec}}$$

Avec :

M_{H2O} : La masse molaire de l'eau, Kg/Kmoles

M_{airsec} : la masse molaire de l'air sec, Kg/Kmoles

A.N : $\Psi_A = \frac{0.032 * 18}{29} = 0.0198$

$$\Psi_A = 0.0198\, Kg \frac{d' H_2O}{Kg}\, d' air sec$$

- $G_{air} = \frac{G_{H2O}(1 + \Psi_A)}{\Psi_A}$

A.N : $G_{air} = \frac{1419,12(1+0,0198)}{0.0198} = 73091,84$

$$G_{air} = 73091,84\, Kg/h$$

- $G_{air sec} = G_{air} - G_{H2O}$

On a :

A.N : $G_{air sec} = 73091,84 - 1419,12 = 71642,82$

$$G_{air sec} = 71642,82\, Kg/h$$

L'air contient 21% d'oxygène et 78% d'azote en poids.

c. Débit d'oxygène :

$G_{O2} = G_{air\ sec} * 0,21$

A.N : $G_{O2} = 71642,82 * 0,21 = 15044,99$

$$G_{O2} = 15044,99\, Kg/h$$

d. Débit d'azote :

$G_{N2} = G_{air\ sec} * 0,78$

A.N : $G_{N2} = 71642,82 * 0,78 = 55881,39$

$$G_{N2} = 55881,39\, Kg/h$$

Le gaz entrant dans le convertisseur est composé d'air (O_2, N_2, Humidité) et d'ammoniac, ce dernier

(NH_3) et directement introduit au niveau du mélangeur (Air/NH_3) avec un débit de 4098,21 Kg/h.

Donc : $G_{NH3} = 4098{,}21/17 = 241{,}07\ Kmoles/h$

Tableau IV.1 : Composition des gaz entrant dans le convertisseur :

Constituants	Débit massique Kg/h	% massique	Débit molaire Kmoles/h	% Molaire
O_2	15044,99	19,68	470,15	16,87
N_2	55881,39	73,10	1995,76	72,08
H_2O	1419,12	1,85	78,84	2,44
NH_3	4098,21	5,36	241,07	8,50
TOTAL	76443,71	100	2785,82	100

2) Gaz sortant du convertisseur

La conversion de l'ammoniac se fait les réactions (1) et (2) suivantes :

$$4\ NH_3 + 5O_2 \longrightarrow 4NO + 6H_2O \qquad \alpha_1 = 96\ \%$$

$$4\ NH_3 + 3O_2 \longrightarrow 2N_2 + 6H_2O \qquad \alpha_2 = 4\ \%$$

a. Quantité de NO formée lors de la réaction (1)

$G_{NO} = Gnh_3 * \alpha_1$

Avec :

G_{NH3} : Débit molaire initial de l'ammoniac. Kmoles/h

G_{NO} : Débit molaire de NO produit. Kmoles/h

A.N : G_{NO} = 241,07 *0,96 =231,43

$G_{NO} = 231{,}43\ Kmoles/h$

b. Quantité d'oxygène sortant de la conversion :

$$G_{O2}^{(S)} = G_{O2}^{(i)} - \left(G_{O2}^{(1)} + G_{O2}^{(2)} \right)$$

Avec :

$G_{O2}^{(S)}$: *Débit molaire d' oxygène sortant de la conversion, Kmoles/h*

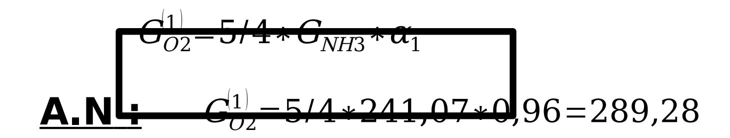
$G_{O2}^{(i)}$: *Débit molaire d' oxygène, Kmoles/h*

$G_{O2}^{(1)}$: *Débit molaire d' oxygène consommé par la réaction* (1)

$G_{O2}^{(2)}$: *Débit molaire d' oxygène consommé par la réaction* (2)

- Quantité d'oxygène consommée par la réaction (1) :

$$G_{O2}^{(1)} = 5/4 * G_{NH3} * \alpha_1$$



A.N : $G_{O2}^{(1)} = 5/4 * 241{,}07 * 0{,}96 = 289{,}28$

$G_{O2}^{(1)} = 289{,}28$

- Quantité d'oxygène consommée par la réaction (2) :

$$G_{O2}^{(2)} = 3/4 * G_{NH3} * \alpha_2$$

A.N : $G_{O2}^{(2)} = 3/4 * 241{,}07 * 0{,}04 = 7{,}23$

$G_{O2}^{(2)} = 7{,}23\ Kmoles/h$

- Quantité total d'oxygène consommée :

$$G_{O2}^{(T)} = G_{O2}^{(1)} + G_{O2}^{(2)}$$

Avec :

$G_{O2}^{(T)}$: Débit molaire total d'oxygène consommé, Kmoles/h

A.N : $G_{O2}^{(T)} = 289{,}28 + 7{,}23 = 296{,}51$

$G_{O2}^{(T)} = 296{,}51\ Kmoles/h$

-
- **Quantité d'oxygène sortie de la conversion :**

On a :

$G_{O2}^{(S)}=G_{O2}^{(i)}-G_{O2}^{(T)}$ $\qquad$ $G_{O2}^{(S)}=G_{O2}^{(i)}-\left(G_{O2}^{(1)}+G_{O2}^{(2)}\right)$

A.N : $G_{O2}^{(i)}=470{,}15-\left(289{,}28+7{,}23\right)=173{,}64$

$G_{O2}^{(S)}=173{,}64\,Kmoles/h$

c. Quantité de vapeur sortie de la conversion :

$G_{H2O}^{(S)}=G_{H2O}^{(i)}+\left(G_{H2O}^{(1)}+G_{H2O}^{(2)}\right)$

Avec :

$G_{H2O}^{(S)}$: *Débit molaire d'eau sortant de la conversion, Kmoles/h*

$G_{H2O}^{(i)}$: *Débit molaire d'eau initiale, Kmoles/h*

$G_{H2O}^{(1)}$: *Débit molaire d'eau de réaction (1), Kmoles/h*

$G_{H2O}^{(2)}$: *Débit molaire d'eau de réaction (2), Kmoles/h*

Donc : $G_{H2O}^{(S)}=G_{H2O}^{(i)}+6/4*G_{NH3}*\alpha_1+6/4*G_{NH3}*\alpha_2$

$\Rightarrow$ $G_{H2O}^{(S)}=G_{H2O}^{(i)}+6/4*G_{NH3}$

A.N : $G_{H2O}^{(S)}=78{,}84+6/4*241{,}07=439{,}99$

$G_{H2O}^{(S)}=439{,}99\,Kmoles/h$

d. Quantité de N_2 sortie convertisseur :

$G_{N2}^{(S)}=G_{N2}^{(i)}+G_{N2}^{(2)}$

Avec :

$G_{N2}^{(S)}$: *Débit molaire d'azote sortie convertisseur, Kmoles/h*

$G_{N2}^{(i)}$: *Débit molaire initial d'azote, Kmoles/h*

$G_{N2}^{(2)}$: *Débit molaire d'azote produit lors de la réaction (2), Kmoles/h*

Donc : $G_{N2}^{(S)} = G_{N2}^{(S)} + 2/4 * G_{NH3} * \alpha_2$

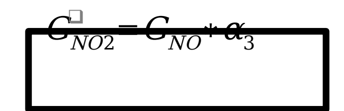
A.N : $G_{N2}^{(S)} = 1995{,}75 + 1/2 * 241{,}07 * 0{,}04 = 2000{,}57$

$G_{N2}^{(S)} = 2000{,}57\ Kmoles/h$

- A la sortie de l'échangeur gaz nitreux/ gaz de queue, on a une réaction d'oxydation de NO en NO_2 selon la réaction (3) :

$$2NO + O_2 \xrightarrow{} 2NO_2 \qquad \alpha_3 = 45\% \quad (3)$$

1. Quantité de NO_2 produite :



$G_{NO2}^{\square} = G_{NO} * \alpha_3$

Avec :

$G_{NO2}^{\square}$: *Débit molaire de NO2 produit lors de la réaction (3).*

G_{NO} : *Débit molaire de NO produit lors de la réaction (1).*

A.N : $G_{NO2}^{\square} = 231{,}43 * 0{,}45 = 104{,}14$

$G_{NO2}^{\square} = 104{,}14\ Kmoles/h$

2. Quantité de NO sortie chaudière de récupération :

$G_{NO}^{(s)} = G_{NO} - G_{NO}^{(3)}$

Avec :

$G_{NO}^{(s)}$: *Débit molaire de NO sortie chaudière de récupération.*

$G_{NO}^{(3)}$: *Débit molaire de NO consommé lors de la réaction (3).*

Donc : $G_{NO}^{(S)} = G_{NO}(1 - \alpha_3)$

A.N : $G_{NO}^{(S)} = 231.4(1 - 0{,}45) = 127{,}29$

$G_{NO}^{(S)} = 127,29\ Kmoles/h$

3. Quantité d'oxygène sortie chaudière de récupération :

$G_{O2}^{(S')} = G_{O2}^{(S)} - G_{O2}^{(C)}$

Avec :

$G_{O2}^{(S')}$:Débit molaire d'oxygène sortie chaudière de récupération, Kmoles/h

$G_{O2}^{(C)}: Débit\ molaire\ d'\ oxygène\ consommé\ lors\ de\ la\ réaction\ (3)$

Donc : $G_{O2}^{(S')} = G_{O2}^{(S)} - 1/2\ G_{NO} * \alpha_3$

A.N : $G_{O2}^{(S')} = 173,64 - 1/2 * 231,43 * 0,45 = 121,6$

$G_{O2}^{(S')} = 121,6\ Kmoles/h$

Donc à la sortie du convertisseur, le gaz sera composé comme suit :

Tableau IV.2 : composition du gaz de la chaudière de récupération et entrant au refroidisseur :

Constituants	Débit massique Kg/h	% massique	Débit molaire Kmoles/h	% molaire
O_2	3891,2	5,09	121,6	4,35
N_2	56015Ψ,96	73,88	2000,57	71,61
H_2O	7919,82	10,36	439,99	15,74
NO	3818,7	4,99	127,29	4,55
NO_2	4790,44	6,26	104,14	3,72
TOTAL	76436,12	100	2793,59	100

IV.1.2 Section de refroidissement des gaz nitreux

Les gaz nitreux quittent la chaudière de récupération à une température de 210°C arrivent au refroidisseur qui les rammène à 55°C. Le refroidisseur NE1048 a pour but de condenser la vapeur d'eau en présence des NO_2 formés pour produire un acide faible. Le taux de condensation atteint 97%, une production d'acide faible de 35% à 37% est assurée suite à la réaction :

$3NO_2 + H_2O \longrightarrow 2HNO_3 + NO$ $\alpha 4 = 85\%$ (4)

Et puisque la réaction d'oxydation de NO en NO_2 est favorisée par la basse température, donc cette réaction se poursuit dans le refroidisseur selon la réaction :

$2NO + O_2 \longrightarrow 2NO_2$ $\alpha_5 = 47\%$ (5)

Cette réaction se fait à 47% à ce niveau

a. Quantité d'NO_2 formée lors de la réaction (5) :

$G'_{NO2} = G_{NO}^{(S)} * \alpha_5$

Avec :

G'_{NO2} : débit molai ℜ de NO2 produit par la réaction (5), Kmoles/h

$G_{NO}^{(S)}$: débit molaire sortant de la chaudière et entrant dans ≤ refroidisseur.

α_5 : ≤ taux d' oxy dation de NO en NO2

A.N : $G'_{NO2} = 127,29 * 0,47 = 59,83$

$G'_{NO2} = 59,83\ Kmoles/h$

b. Quantité d'acide formée dans le refroidisseur :

Le taux de formation de l'acide est 85%

$G_{HNO3} = 2/3\, G_{NO2} * \alpha_4$

Avec :

$G_{HNO3}: débit\, molaire\, d'\, acide\, produit, Kmoles/h$

$G_{NO2}: débit\, molaire\, d'\, NO2\, sortant\, de\, la\, chaudière\, et\, rentrant\, dans \leq refroidisur.$

A.N : $G_{HNO3}=2/3*104,14*0,85=59,01$

$G_{HNO3}=59,01\ Kmoles/h$

c. Quantité d'NO_2 qui sort du refroidisseur :

$G_{NO2}^{(S)}=G'_{NO2}+G_{NO2}^{(R)}$

Avec :

$G_{NO2}^{(S)}: débit\, molaire\, d'\, NO2\, qui\, sort\, du\, refroidisseur, Kmoles/h$

$G_{NO2}^{(R)}: débit\, molaire\, d'\, NO2\, qui\, n'\, a\, pas\, réagit, Kmoles/h$

$G_{NO2}^{(S)}=G'_{NO2}+G_{NO2}(1-\alpha_4)$

A.N : $G_{NO2}^{(S)}=59,83+104,14*(1-085)=75,45$

$G_{NO2}^{(S)}=75,45\ Kmoles/h$

d. Quantité d'NO qui sort du refroidisseur :

$G_{NO}^{(S)}=G'_{NO}+G_{NO}^{(R)}$

Avec :

$G_{NO}^{(S)}: débit\, molaire\, de\, NO\, qui\, sort\, du\, refroidisseur, Kmoles/h$

$G'_{NO}: débitt\, molaire\, do\, NO\, formé\, lors\, de\, la\, réaction\, (4), Kmole/h$

$G_{NO}^{(R)}: débit\, molaire\, de\, NO\, qui\, n'\, a\, pas\, réagit\, (réaction\, (5)), Kmoles/h$

- $G_{NO}^{(R)}=?$

$2NO + O_2 \longrightarrow 2NO_2$

$\alpha_5=47\%$ (5)

D'après la réaction (5) on a :

$G_{NO}^{(R)}=G_{NO}^{(S)}(1-\alpha_5)$

A.N : $G_{NO}^{(R)}=127,29(1-0,47)=67,46$

$G_{NO}^{(R)}=67,46\ Kmoles/h$

- $G'_{NO}=?$

$3NO_2$ + H2O → $2HNO_3$ + NO α4 = 85% (4)

D'après la réaction (4) on a :

$$G'_{NO}=1/3\ G_{NO2}*\alpha_4$$

A.N : $G'_{NO}=1/3*104,14*0,85=29,51$

$G'_{NO}=29,51\ Kmoles/h$

Donc : $G_{NO}^{(S)}=G'_{NO}+G_{NO}^{(R)}$

A.N : $G_{NO}^{(S)}=29,51+67,46=96,97$

$G_{NO}^{(S)}=96,97\ Kmoles/h$

e. Quantité d'O_2 qui sort du refroidisseur :

$G_{O2}^{(S)}=G_{O2}^{(S')}-G_{O2}^{(C')}$

Avec :

$G_{O2}^{(S)}$: Débit molaire d'O2 qui sort du refroidisseur, Kmoles/h

$G_{O2}^{(S')}$: Débit molaire d'O2 qui entre au refroidisseur, kmoles/h

$G_{O2}^{(C')}$: Débit molaire d'O2 consommée dans la réaction (5), kmoles/h

- $G_{O2}^{(C')}=?$

$G_{O2}^{(C')}=1/2*G_{NO}^{(S)}*\alpha_5$

D'après la réaction (5) on a :

A.N : $G_{O2}^{(C')}=1/2*127,29*0,47=29,91$

$G_{O2}^{(C')} = 29{,}91\ Kmoles/h$

Donc : $G_{O2}^{(S)} = G_{O2}^{(S')} - G_{O2}^{(C')}$

A.N : $G_{O2}^{(S)} = 121{,}6 - 29{,}91 = 91{,}69$

$G_{O2}^{(S)} = 91{,}69\ Kmoles/h$

f. Quantité de vapeur d'eau qui sort du refroidisseur (non condensée) :

La condensation de vapeur d'eau dans le refroidisseur de gaz se fait à 97%.

$G_{H2O}^{(S')} = G_{H2O}^{(S)}(1 - 0{,}97)$

Avec :

$G_{H2O}^{(S')}$: Débit molaire de vapeur d'eau qui sort du refroidisseur, kmoles/h

$G_{H2O}^{(S)}$: Débit molaire de vapeur d'eau qui entre au refroidisseur, Kmoles/h

A.N : $G_{H2O}^{(S')} = 439{,}99(1 - 0{,}97) = 13{,}19$

$G_{H2O}^{(S')} = 13{,}19\ Kmoles/h$

g. Quantité d'eau dépensée pour la formation de l'acide faible :

$3NO_2 + H_2O \longrightarrow 2HNO_3 + NO$

$\alpha_4 = 85\%$ (4)

$G_{H2O}^{(4)} = 1/3 * G_{NO2} * \alpha_4$

Avec :

$G_{H2O}^{(4)}$: Quantité d'eau nécessaire pour la formation de l'acide faible, Kmoles/h

A.N : $G_{H2O}^{(4)} = 1/3 * 104{,}14 * 0{,}85 = 29{,}51$

$G_{H2O}^{(4)} = 29{,}51\ Kmoles/h$

h. Quantité de vapeur d'eau condensée :

$$G_{H2O}^{(cond)} = G_{H2O}^{(S)} * \alpha_{Cond}$$

Avec :

$G_{H2O}^{(cond)}$: Débit molaire condensée, Kmoles/h

$G_{H2O}^{(S)}$: Débit molaire d'eau qui entre dans le refroidisseur, kmoles/h

α_{Cond}: Le taux de condensation

A.N : $G_{H2O}^{(cond)} = 439,99 * 0,97 = 426,79$

$$G_{H2O}^{(cond)} = 426,79\ Kmoles/h$$

i. Quantité d'eau nécessaire pour la dilution de l'acide nitrique :

$$G_{H2O}^{(D)} = G_{H2O}^{(S)} - G_{H2O}^{(S')} - G_{H2O}^{(4)}$$

Avec :

$G_{H2O}^{(D)}$: Débit molaire d'eau de dilution, Kmoles/h

A.N : $G_{H2O}^{(D)} = 439,99 - 13,19 - 29,51 = 397,29$

$$G_{H2O}^{(D)} = 397,29\ Kmoles/h$$

j. Concentration de l'acide formé dans le refroidisseur :

C_{HNO3}: La concentration de l'acide formé dans le refroidisseur

$$C_{HNO3} = \frac{G_{HNO3} * M_{HNO3} * 100}{(G_{HNO3} * M_{HNO3}) + (G_{H2O}^{(D)} * M_{H2O})}$$

A.N :

$$C_{HNO3} = \frac{59,01 * 63 * 100}{(59,01 * 63) + (397,29 * 18)} = 34,20\%$$

C_{HNO3}=34,20%

Tableau IV.3 : Composition de condensat :

Constituants	Débit massique Kg/h	% massique	Débit molaire Kmoles/h	% Molaire
H2O	7151,22	65,79	397,22	87,06
HNO3	3717,63	34,20	59,01	12,93
TOTAL	10868,85	100	456,3	100

Tableau IV.4 : Composition du mélange gazeux sortant du condenseur :

Constituants	Débit massique Kg/h	% massique	Débit molaire Kmoles/h	% Molaire
O2	2934,08	4,47	91,69	4,02
N2	56015,96	85,43	2000,57	87,82
H2O	237,42	0,36	13,19	0,57
NO	2909,1	4,43	96,97	4,25
NO2	3470,7	5,29	75,45	3,31
TOTAL	65567,26	100	2277,87	100

IV.1.3 Zone d'oxydation

Les gaz sortant du refroidisseur entrant dans la colonne avant la zone d'absorption. Ces gaz passent par la zone d'oxydation ou une réaction d'oxydation se réalise :

$$2NO + O_2 \rightleftarrows NO_2 \quad (6)$$

Cette réaction se fait à 98%

Donc les gaz entrant dans la zone d'oxydation sont la somme des gaz sortants du refroidisseur et l'air secondaire venant de la zone de blanchiment. L'air secondaire servant pour l'oxydation, représente 13% du Débit d'air total refoulé du compresseur d'air. L'oxygène utilisé dans cette zone est la somme de l'oxygène de l'air secondaire venant de la zone de blanchiment.

. Quantité d'O_2dan l'air secondaire :

13% en volume d'air sortant du compresseur à 216°C passe par un refroidisseur dit secondaire utilisant l'eau de refroidisseur pour abaisser la température jusqu'à 74°C.

$$G_{O2}^{13\%}=\frac{G_{O2}^{87\%}*13}{87}$$

Avec :

$G_{O2}^{13\%}$: Quantité d'oxygène contenue dans l'air secondaire, Kg/h

$G_{O2}^{87\%}$: Quantité d'oxygène contenue dans l'air primaire, Kg/h

A.N : $G_{O2}^{13\%}=\frac{15044,99*13}{87}=2248,10$

$G_{O2}^{13\%}=2248,10\,Kg/h$

- **Quantité d'N2 dans l'air secondaire :**

$$G_{N2}^{13\%}=\frac{G_{N2}^{87\%}*13}{87}$$

Avec :

$G_{N2}^{13\%}$: Quantité d'azote contenue dans l'air secondaire, Kg/h

$G_{N2}^{87\%}$: Quantité d'azote contenue dans l'air primaire, Kg/h

A.N : $G_{N2}^{13\%}=\frac{55881,39*13}{87}=8350,09$

$G_{N2}^{13\%}=8350,09\ Kg/h$

- **Quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air secondaire :**

$$G_{H2O}^{13\%}=\frac{G_{H2O}^{87\%}*13}{87}$$

Avec :

$G_{H2O}^{13\%}$: Quantité de vapeur contenue dans l'air secondaire, Kg/h

$G_{H2O}^{87\%}$: Quantité de vapeur contenue dans l'air primaire, Kg/h

A .N : $G_{H2O}^{13\%}=\frac{1419,12*13}{87}=212,05$

$G_{H2O}^{13\%}=212,05\ Kg/h$

Gaz entrant dans la zone d'oxydation :

Les gaz entrant dans la zone d'oxydation sont la somme des gaz sortant du refroidisseur et les gaz venant de blanchiment (air secondaire).

a. **Débit total d'oxygène entrant dans la zone d'oxydation :**

$$G_{O2}^{(T)}=G_{O2}^{13\%}+G_{O2}^{(S)}$$

Avec :

$G_{O2}^{(T)}$: Débit massique total d'oxygène entrant dans la zone d'oxydation, Kg/h

$G_{O2}^{(S)}$: Débit massique d'oxygène sortant du refroidisseur, Kg/h

A.N : $G_{O2}^{(T)}=2248,10+2934,08=5182,18$

$G_{O2}^{(T)}=5182,18\ Kg/h$

b. **Débit total d'azote entrant dans la zone d'oxydation :**

$$G_{N2}^{(T)} = G_{N2}^{13\%} + G_{N2}^{(S)}$$

Avec :

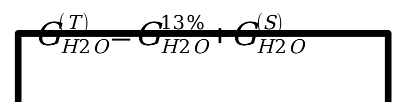
$G_{N2}^{(T)}$: Débit total d'azote entrant dans la zone d'oxydation, Kg/h

G_{N2}^{S}: Débit d'azote sortant du refroidisseur, Kg/h

A.N : $G_{N2}^{(T)} = 8350{,}09 + 56015{,}96 = 64366{,}05$

$$G_{N2}^{(T)} = 64366{,}05\, Kg/h$$

c. Débit total de vapeur d'eau entrant dans la zone d'oxydation :



$$G_{H2O}^{(T)} = G_{H2O}^{13\%} + G_{H2O}^{(S)}$$

Avec :

$G_{H2O}^{(T)}$: Débit total de vapeur d'eau entrant dans la zone d'oxydation, Kg/h

G_{H2O}^{S}: Débit de vapeur sortant du refroidisseur, Kg/h

A.N : $G_{H2O}^{(T)} = 212{,}05 + 237{,}42 = 449{,}47$

$$G_{H2O}^{(T)} = 449{,}47\, Kg/h$$

Tableau IV.5 : Composition des gaz dans l'air secondaire :

Constituants	Débit massique Kg/h	% Massique	Débit molaire Kmoles/h	% molaire
O_2 N_2 H_2O	2248,10 8350,09 212,05	20,79 77,24 1,96	70,25 298,27 11,78	18,47 78,42 3,08
TOTAL	10810,24	100	380,24	100

Tableau IV.6 : Composition des gaz entrant dans la zone d'oxydation :

Constituants	Débit massique Kg/h	% massique	Débit molaire Kmoles/h	% molaire
O_2	5182,18	6,78	161,94	6,09
N_2	64366,05	84,27	2298,78	86,48
H_2O	449,47	0,58	24,97	0,93
NO	2909,1	3,80	96,97	3,64
NO_2	3470,7	4,54	75,45	2,83
TOTAL	76377,5	100	2658,11	100

a. Quantité de NO_2 formée lors de la réaction d'oxydation (6) :

X = 98% l'avancement de la réaction d'oxydation (6)

2NO + O2 ⇄ NO2 X = 98% (6)

$$G'_{NO2} = G_{NO}^{(S)} * X$$

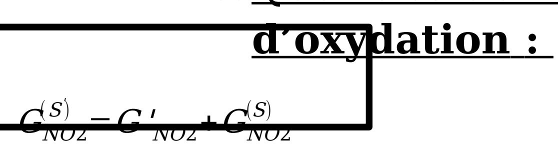
Avec :

G'_{NO2} : le débit molaire de dioxyde d'azote formé lors de la réaction (6), Kmoles/h

A.N : $G'_{NO2} = 96{,}97 * 0{,}98 = 95{,}03$

$$G'_{NO2} = 95{,}03\ Kmoles/h$$

b. Quantité de NO_2 qui sort de la zone d'oxydation :



$$G_{NO2}^{(S)} = G'_{NO2} + G_{NO2}^{(S)}$$

Avec :

$G^{(S)}_{NO2}$: Débit molaire de NO_2 qui sort de la zone d'oxydation, Kmoles/h

$G^{(S)}_{NO2}$: Débit molaire de NO_2 qui entre dans la zone d'oxydation, Kmoles/h

A.N : $G^{(S)}_{NO2} = 95,03 + 75,45 = 170,48$

$G^{(S)}_{NO2} = 170,48\ Kmoles/h$

c. Quantité de monoxyde d'azote NO qui sort de la zone d'oxydation :

$$G^{(S)}_{NO} = G^{(S)}_{NO} - G'_{NO2}$$

$$G^{(S)}_{NO} = G^{(S)}_{NO}(1 - 0,98)$$

Avec :

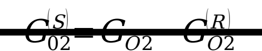
$G^{(S)}_{NO}$: Débit molaire de NO qui sort de la zone d'oxydation, Kmoles/h

$G^{(S)}_{NO}$: Débit molaire de NO qui entre dans la zone d'oxydation, Kmoles/h

A.N : $G^{(S)}_{NO} = 96,97 - 95,03 = 1,94$

$G^{(S)}_{NO} = 1,94\ Kmoles/h$

d. Quantité d'O_2 qui sort de la zone d'oxydation :



$$G^{(S)}_{02} = G_{O2} - G^{(R)}_{O2}$$

Avec :

$G^{(S)}_{02}$: Débit molaire d'O_2 qui sort de la zone d'oxydation, Kmoles/h

G_{O2} : Débit molaire d'O_2 qui entre dans la zone d'oxydation, Kmoles/h

$G_{O2}^{(R)}$: Débit molaire d'O_2 qui réagit dans la réaction (6), Kmoles/h

A.N : $G_{02}^{(S)}=161{,}94-\frac{1}{2}*96{,}97*0{,}98=114{,}43$

$G_{02}^{(S)}=114{,}43\ Kmoles/h$

Gaz sortant de la zone d'oxydation et entrant dans la zone d'absorption :

Tableau IV.7 : Composition des gaz sortant de la zone d'oxydation et entrant dans la zone d'absorption :

Constituants	Débit massique Kg/h	% massique	Débit molaire Kmoles/h	% molaire
O_2	3661,76	4,79	114,43	4,38
N_2	64366,05	84,27	2298,78	88,05
H_2O	449,47	0,58	24,97	0,95
NO	58,2	0,57	1,94	0,07
NO_2	7842,08	10,26	170,48	6,53
TOTAL	**76377,56**	**100**	**2610,6**	**100**

IV.1.4. Zone d'absorption

Le dioxyde d'azote NO_2 sortant de la zone d'oxydation sera absorbé en contact avec l'eau de procédé à contre courant sur les plateaux de la colonne d'absorption, d'où la production de l'acide nitrique HNO_3.

Les débits réels utilisés et produits dans cette zone sont :

- Débit d'eau procédé : $G_{H2O}^{(E)}=20382{,}93\ Kg/h$.

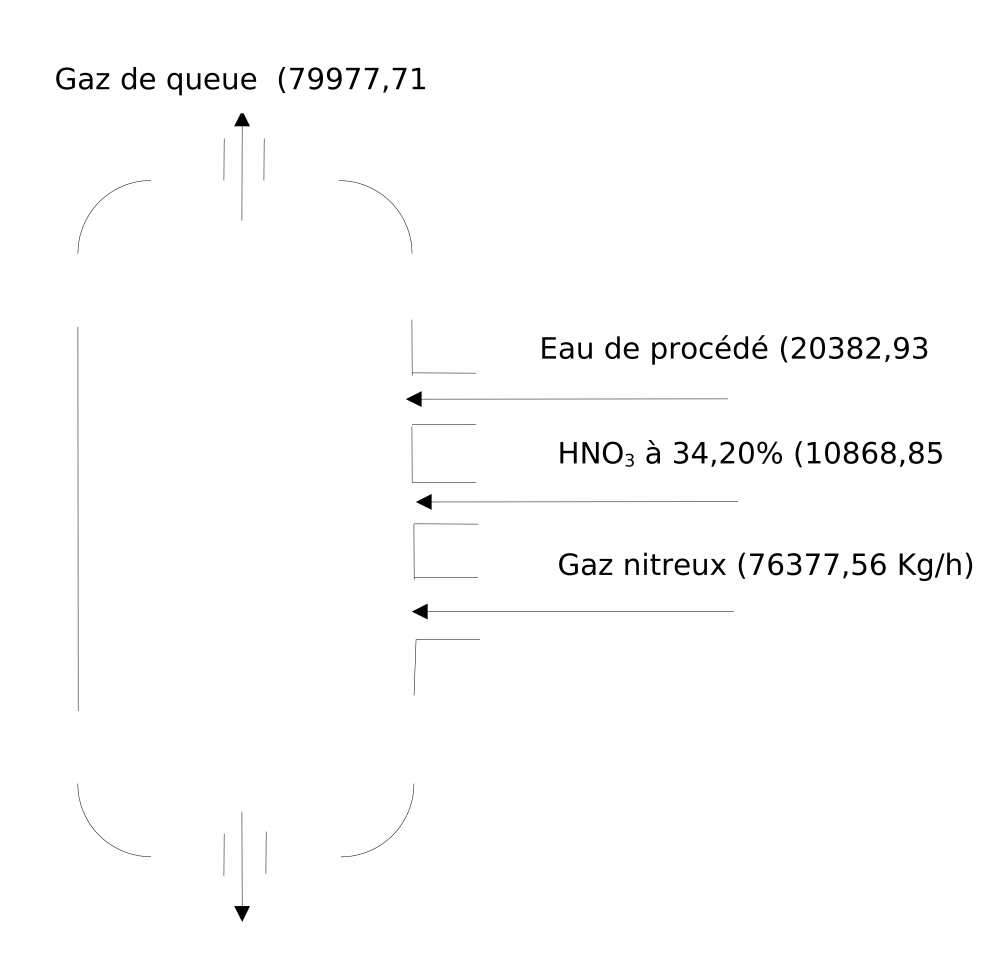
- Débit d'acide dilué à 34,20% :
  $G_{HNO3}^{34,20\%} = (7151,22 + 3717,63) = 10868,85\ Kg/h$
- Débit d'acide produit à 57% : $G_{HNO3}^{57\%} = 27651,63\ Kg/h$
- Débit des gaz totaux entrant dans la zone d'absorption :
  $G_{gaz}^{(E)} = 76377,56\ Kg/h$

Bilan matière global de la zone d'absorption (Voir Figure IV.1)

Il n y a pas d'accumulation dans la colonne (ce qui entre = ce qui sort).

⇨ (Gaz nitreux) + (HNO3 à 34,71%) + (eau procédé) = (Gaz de queue) + (HNO3 à 57%)

$$G_{gaz}^{(E)} + G_{HNO3}^{34,20\%} + G_{H2O}^{(E)} = G_{gaz}^{(S)} + G_{HNO3}^{57\%}$$



HNO_3 à 57% (27651,63

Fig.IV.1 : BILAN matière global sur la zone d'absorption

a. Débit de gaz de queue (sortant) :

$$G_{gaz}^{(S)} = G_{gaz}^{(E)} + G_{HNO3}^{34,20\%} + G_{H2O}^{(E)} - G_{HNO3}^{57\%}$$

Avec :

$G_{gaz}^{(S)}$: Débit massique de gaz de queue (sortant), Kg/h

A.N : $G_{gaz}^{(S)} = 76377,56 + 20382,93 + 10868,85 - 27651,63 = 79977,71$

$$G_{gaz}^{(S)} = 79977,71\ Kg/h$$

- Le gaz de queue sortant de la colonne est composé de (O_2,N_2,H_2O,NO_X(NO,NO_2)).

- L'azote et vapeur d'eau ne réagissent pas dans la colonne, leurs débits restent constants.
- Le pourcentage d'oxygène dans le gaz sortant de la colonne est 2,6% en volume (pas analyse)(feuillie d'analyse).
- La masse molaire de gaz de queue est de M=28,76 g/mol

b. Débit d'oxygène sortant de la colonne :

$$Q_{O2}^{(S)} = 0,026 * Q_{Gaz}^{(S)}$$

Avec :

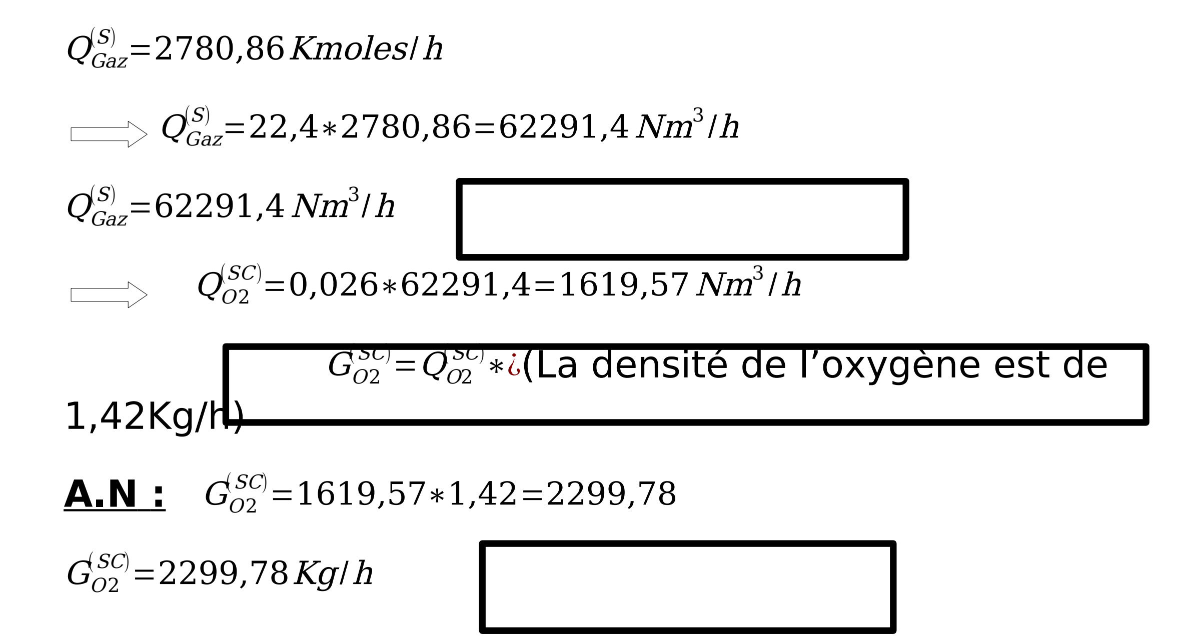
$Q_{O2}^{(S)}$: Débit volumique d'oxygène sortant, Nm^3/h

$Q_{Gaz}^{(S)}$: Débit volumique du gaz de queue (sortant), Nm^3/h

$$Q_{Gaz}^{(S)} = \frac{Q_{Gaz}^{(S)}}{densité}$$

A.N : $Q_{Gaz}^{(S)} = \frac{79977,71}{28,76} = 2780,86$

$Q_{Gaz}^{(S)}=2780,86\,Kmoles/h$



⇨ $Q_{Gaz}^{(S)}=22,4*2780,86=62291,4\,Nm^3/h$

$Q_{Gaz}^{(S)}=62291,4\,Nm^3/h$

⇨ $Q_{O2}^{(SC)}=0,026*62291,4=1619,57\,Nm^3/h$

$G_{O2}^{(SC)}=Q_{O2}^{(SC)}*¿$(La densité de l'oxygène est de 1,42Kg/h)

A.N : $G_{O2}^{(SC)}=1619,57*1,42=2299,78$

$G_{O2}^{(SC)}=2299,78\,Kg/h$

c. **Détermination de la quantité des NO_x sortant de la colonne :**

$G_{NOX}^{(S)}=G_{NO}^{(S)}+G_{NO2}^{(S)}$

Nous avons :

$G_{NOX}^{(S)}=2649\,ppm$ (Fiche de contrôle).

$G_{NOX}^{(S)}$: Quantité des NOx sortant de la colonne (avant réduction)

Teneur NOx en Kg/h :

$G_{NOX}^{(S)}(Kg/h)=\frac{G_{NOX}^{(S)}(ppm)*G_{Gaz}^{(S)}}{10^6}$

A.N : $G_{NOX}^{(S)}=\frac{2649*79977,7}{10^6}=211,86$

$G_{NOX}^{(S)}=211,86\,Kg/h$

- **Quantité de NO_2 sortie de la colonne :**

a) **Quantité de NO_2 ayant réagie dans la colonne :**

On a la réaction :

$3NO_2 + H_2O \longrightarrow 2HNO_3 + NO$

$\alpha_7 = 98\%$

$$G_{NO2}^{(réagie)} = G_{HNO3}^{(prod)} * 3/2$$

$$G_{HNO3}^{(prod)} = G_{HNO3}^{(tot)} - G_{HNO3}^{(34,20\%)}$$

$$G_{HNO3}^{(tot)} = G_{HNO3}^{(57\%)} * 0,57 = 27651,63 * 0,57 = 15761,42$$

$$G_{HNO3}^{(tot)} = 15761,42\ Kg/h$$

$$G_{HNO3}^{(prod)} = 15761,42 - 10868,85 = 4892,57$$

$$G_{HNO3}^{(prod)} = 4892,57\ Kg/h$$

⇒ $$G_{HNO3}^{(prod)} = 77,65\ Kmoles/h$$

$$G_{NO2}^{(réagie)} = \frac{77,65 * 3}{2} = 116,48\ Kmoles/h$$

b) <u>Quantité des NO2 non réagie :</u>

$$G_{NO2}^{(non\ réagie)} = G_{NO2}^{(réagie)} * 0,02$$

<u>A.N :</u> $G_{NO2}^{(non\ réagie)} = 116,48 * 0,02 = 2,32$

$$G_{NO2}^{(non\ réagie)} = 2,32\ Kmoles/h$$

$$G_{NO2}^{(non\ réagie)} = 107,17\ Kg/h$$

- **Quantité de NO sortie colonne :**

$$G_{NO}^{(SC)} = G_{NOx}^{(SC)} - G_{NO2}^{(SC)}$$

<u>A.N :</u> $G_{NO}^{(SC)} = 211,86 - 107,17 = 104,69$

$$G_{NO}^{(SC)} = 104,69\ Kg/h$$